

低副瓣三次模压缩偶极子天线的设计

安文星[†], 赵文莉, 罗宇
(天津大学 微电子学院, 天津 300072)

摘要:针对模式压缩偶极子天线目前存在的高副瓣问题,提出一种低副瓣三次模压缩偶极子天线的设计,通过采用在偶极子天线上加载弯折电感的方式,获得较大压缩系数值,减小反向电流的辐射口面,从而设计出低副瓣高增益的模式压缩天线,实现了-15.35 dB 的低副瓣和 5.11 dBi 的增益性能,降低了互扰,增大天线的传输距离和传输速率.为验证仿真模型的有效性,利用 PCB 技术加工出实物并进行测试,其仿真和测试结果比较吻合.

关键词:低副瓣;三次模;压缩偶极子天线;弯折电感

中图分类号:TN821.4

文献标志码:A

Design of Compressed Dipoles Resonating at the Third Mode with Low Side-lobe

AN Wenxing[†], ZHAO Wenli, LUO Yu
(School of Microelectronics, Tianjin University, Tianjin 300072, China)

Abstract: In this paper, The design of a low side-lobe compressed dipole resonating at the third mode is proposed in order to solve the problem of a high side-lobe in the mode compressed dipole antenna. This paper adopts a method of loading a bent inductor on the dipole antenna to achieve a larger compression coefficient, thus the radiation interface of the reverse current is reduced. Finally, the target of designing mode compression antenna with low side-lobe and high gain is realized, which achieves a low side-lobe of -15.35 dB and a gain of 5.11 dBi. The mutual interference is reduced, and the transmission distance and speed are increased. In order to verify the validity of the simulation model, the PCB technology is used to manufacture the model and test it. The simulation results are in good agreement with the test results.

Key words: low side-lobe; the third mode; compressed dipole antenna; bent inductor

偶极子天线是 19 世纪 80 年代由 Hertz 提出,也是应用最为广泛的天线单元.偶极子天线以及由偶

极子天线组成的八木-宇田天线^[1-3]、对数周期天线^[4-6]等自二战起就广泛应用于各种无线通信系统中.

* 收稿日期:2020-09-22

基金项目:国家自然科学基金资助项目(61701339), National Natural Science Foundation of China(61701339); 广东扬帆计划引进创新创业团队资助项目(2016YT04G420), Guangdong Yangfan Plans to Introduce Innovative Entrepreneurship Team Project(2016YT04G420)

作者简介:安文星(1984—),男,天津人,天津大学副教授

[†] 通信联系人, E-mail: 15210835573@163.com

偶极子可以工作在不同的谐振模式. 在自由空间中, 当偶极子的长度为半波长的整数倍时, 偶极子谐振. 而当偶极子周围加载介质时, 偶极子的谐振长度会被压缩, 将这个压缩系数定义为 K . 如图 1 所示, 横坐标代表偶极子的压缩系数 K , 纵坐标代表偶极子的谐振模式. 根据偶极子天线原理, 对于非压缩 ($K \approx 1$) 高次谐振模式偶极子 (图 1 中的竖直条带部分), 偶极子的副瓣远大于主瓣, 这就导致偶极子主瓣增益较低. 文献[7]研究了加载介质对于基模谐振偶极子的影响, 在加载高介电常数的介质后, 偶极子长度被压缩 (图 1 的水平条带部分), 波瓣宽度变大, 增益降低. 因此, 为了避免低增益, 以往文献中的偶极子天线几乎都是基模谐振且压缩系数接近 1, 这种偶极子天线增益理论上不超过 2.15 dBi.

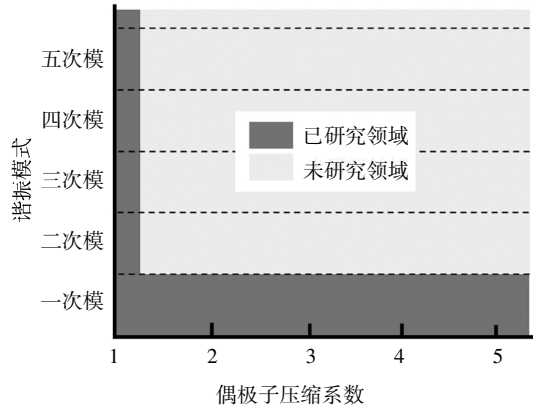


图 1 偶极子天线研究范围示意图

Fig.1 Schematic diagram of dipole antenna research scope

可以看到, 在图 1 中还有大片浅色的未研究领域, 针对这一现状, 模式压缩偶极子的概念被提了出来^[8]. 此概念的提出将偶极子这一最基础、应用最广泛的天线理论研究范围从非压缩高次模式偶极子与压缩基模偶极子这两条“线”拓展到模式压缩偶极子这个“面”上. 由于模式压缩偶极子是近年来提出的概念, 因此这方面的研究相对有限.

1 压缩偶极子天线的分析

文献[8]给出了三次谐振模式下的传统偶极子与压缩偶极子的示意图, 如图 2 所示, 可以看到偶极子天线上的电流呈正弦分布, 随着压缩系数变大, 压缩偶极子的电长度变为原来的 1/2, 明显变短.

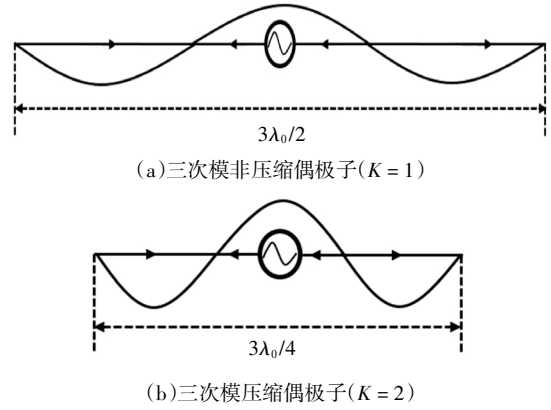


图 2 三次谐振模式下的传统偶极子与压缩偶极子示意图

Fig.2 Schematic diagram of traditional dipole antenna and compressed dipole antenna in the third resonance mode

根据文献[8]所述.

$$E_{\theta} = j \frac{I_m 60\pi}{\lambda_0} \frac{e^{-j\beta_0 r}}{r} \sin\theta \int_{-L_d/2}^{L_d/2} \sin\beta_d(L_d/2 - y) \times e^{-j\beta_0 y \cos\theta} dy \quad (1)$$

式中: I_m 为电流幅值; d 为偶极子; L_d 为偶极子长度; E_{θ} 是辐射远场电流; $\beta_0 = 2\pi/\lambda_0$ 是自由空间中的相位常数; β_d 是偶极子的相位常数.

通过式(1)可以计算出压缩偶极子天线在不同谐振模式和压缩系数下的增益. $i = L_d\beta_d/\pi$ 是偶极子的压缩模式; $K = \beta_d/\beta_0$ 是偶极子的压缩系数. 随着 K 值增加, 增益到达峰值, 针对这一特性, 目前模式压缩偶极子天线的研究都集中在高增益上.

文献[8]通过对高次模式压缩偶极子加载高介电常数的微带基片, 实现增益为 4.6 dBi 的偶极子天线单元设计, 比传统偶极子提高约 2.45 dBi. 在此基础上, 文献[9]在高次模式偶极子上加载伪表面等离子体激元, 将高次模式偶极子的压缩系数提高了 11% 左右, 实现了 3.7 dBi 的偶极子单元设计. 可是文献[8]中副瓣高达 -3 dB, 文献[9]中副瓣几乎和主瓣一样大, 高副瓣严重抑制了模式压缩偶极子的应用范围, 缩短了天线的通信距离. 文献[10]虽然针对目前存在的高副瓣问题, 研究了模式压缩天线压缩系数与副瓣之间的关系, 提出通过增大压缩系数实现低副瓣的模式压缩偶极子天线设计, 但是未提出具体的低副瓣模式压缩偶极子天线设计.

2 低副瓣三次模压缩偶极子天线的设计

随着未来大数据传输、万物互联、低时延等各种数据业务的日益普及, 站点数量在不断增加, 经常需

要在建筑物上安装数量众多的微波天线, 天线朝向不同, 导致传播路径上各天线间产生严重干扰. 为了减少干扰, 对微波天线的性能指标提出更高的要求, 尤其需要天线具备更低副瓣的辐射方向图性能, 以增加天线的传输距离和传输速率.

为解决模式压缩偶极子目前存在的高副瓣问题, 设计了一款低副瓣三次模压缩偶极子天线, 实现了-15.35 dB 的低副瓣和 5.11 dBi 的增益, 与文献[8]的副瓣相比下降了约 12 dB, 如表 1 所示, 在降低副瓣的同时提高了增益, 拓宽了相对带宽.

表 1 文献[8]与本设计的参数对比列表

Tab.1 The parameter comparison list of reference 9 and this design

方法	增益/dBi	副瓣/dB	板材	相对带宽/%
文献[8]	4.6	-3	Rogers RO3010	2.64
本文设计	5.11	-15.35	Rogers RO3010	3.07

图 3 所示为低副瓣三次模压缩偶极子天线的结构图, 选择相对介电常数为 11.2、板材厚度为 1.27 mm 的 Rogers RO3010 敷铜板作为介质板, 采用高介电常数的介质板实现了偶极子天线的三次模谐振. 天线尺寸为 72 mm × 90 mm, 表 2 所示为低副瓣三次模压缩偶极子天线的具体结构参数.

所提出的压缩偶极子天线采用阶梯型微带线进行馈电, 同时加载了不规则地板. 不规则地板的设计不仅可以拓宽带宽, 还可以增强目标频段的阻抗匹配能力. 在偶极子上加载两对弯折电感, 其中较小的弯折电感可以增强阻抗匹配, 较大的弯折电感使压缩偶极子天线获得较大的压缩系数, 实现低副瓣模式压缩偶极子天线设计. 阶梯型微带线和偶极子的右臂位于介质板的上层, 如图 3(a)所示; 不规则地板和偶极子的左臂位于介电常数的下层, 如图 3(b)所示; 图 3(c)是偶极子天线的左臂、右臂与介质板的相对位置.

根据文献[11]所述.

$$K = c \times i/2f_i L_d \tag{2}$$

式中: c 为自由空间中的光速; f_i 为谐振模次数的谐振频点.

通过式(2)可以计算出压缩系数 $K \approx 2.04$, 比文献[8]的压缩系数值提高了 10.27%, 选取此压缩系数不仅保持了偶极子天线较高的增益性能, 还使天线获得-15.35 dB 的低副瓣.

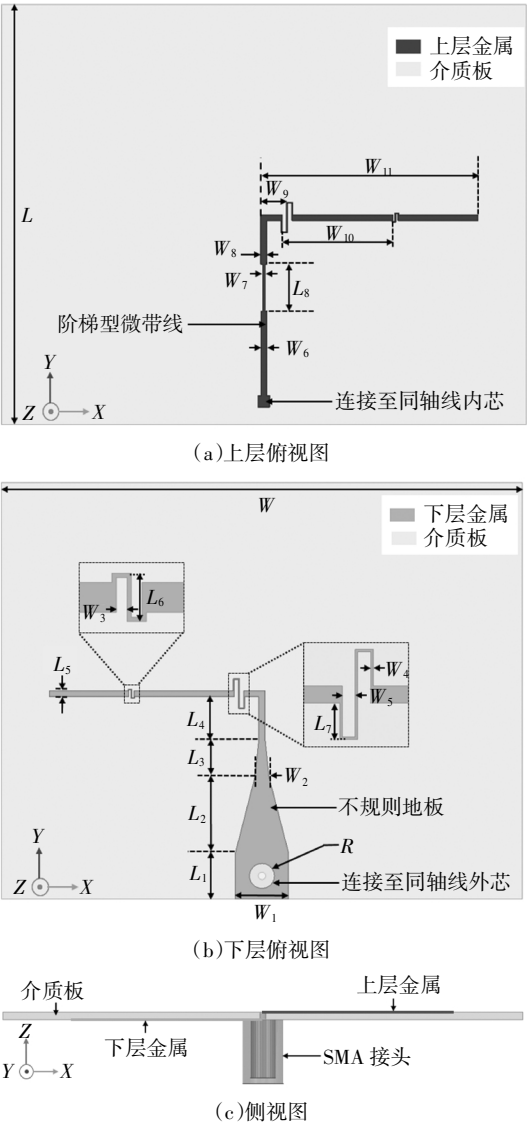


图 3 压缩偶极子天线结构图

Fig.3 Structure of compressed dipole antenna

表 2 压缩偶极子天线的结构参数列表

Tab.2 Structure parameter list of compressed dipole antenna

参数	数值/mm	参数	数值/mm
L	72	W_2	2.5
L_1	8	W_3	0.35
L_2	13	W_4	0.15
L_3	6.5	W_5	0.75
L_4	7.5	W_6	2.5
L_5	1	W_7	0.44
L_6	1.62	W_8	1.1
L_7	2.1	W_9	3.35
L_8	8	W_{10}	19
W	90	W_{11}	37.3
W_1	1	R	4.3

使用三维电磁仿真软件 HFSS (High Frequency Structure Simulator) 对上述天线进行仿真设计, 得到 3 GHz 处的电流分布, 如图 4 所示. 沿偶极子方向的电流呈正弦分布, 且存在反向电流, 表明偶极子在三次模处发生谐振.

当天线在基模谐振时, 沿偶极子电流方向一致, 辐射方向图副瓣较低. 当 $K > 1$ 时, 偶极子长度变短, 且在较高的谐振模式下, 偶极子上出现反向电流, 导致辐射方向图副瓣电平较高, 出现高副瓣. 通过在模式压缩偶极子上加载弯折电感, 获得 2.04 的压缩系数, 压缩了反向电流的有效长度, 如图 4 所示, 中间反向电流的长度明显小于半波长, 因此显著减小了反向电流的辐射口面, 使得天线的辐射方向图获得低副瓣.

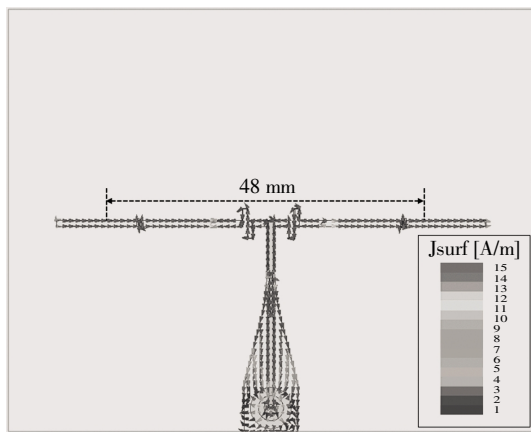


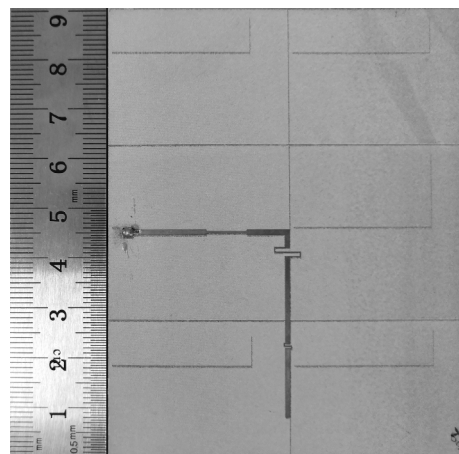
图 4 3 GHz 处的电流分布图

Fig.4 Current distribution at 3 GHz

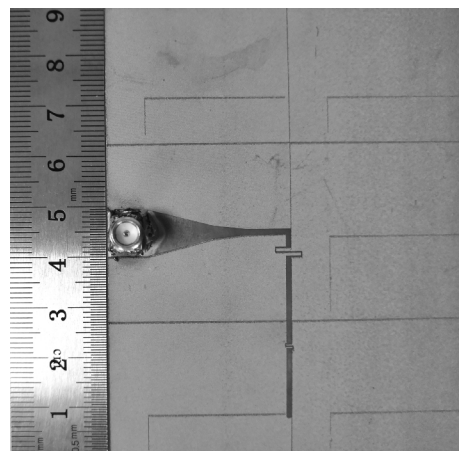
通过计算可以得出, 自由空间中 3 GHz 对应的半波长为 50 mm. 图 4 的仿真结果显示, 两侧偶极子天线单元中心距离为 48 mm, 接近半波长 50 mm. 中间加载有弯折线的偶极子天线单元, 由于弯折线的加载减小了反向电流的有效长度和辐射口面, 同时, 弯折线表面存在向上和向下的电流, 使得中间部分偶极子单元辐射的能量相互抵消, 降低了对辐射方向图的影响. 传统偶极子天线单元的增益是 2.15 dBi, 采用 1×2 的天线阵列设计, 单元中心间距为半波长, 可以提高 3 dBi 的增益, 达到 5.15 dBi. 对于低副瓣三次模压缩偶极子天线, 其具有同向电流的振子间距也接近半波长, 故低副瓣三次模压缩偶极子天线实现了与传统 1×2 阵列天线一致的增益值. 仿真和测试结果表明, 本设计实现了 5.11 dBi 的增益, 验证了上述分析.

3 低副瓣三次模压缩偶极子天线的性能验证

为验证仿真模型的有效性, 采用 PCB 加工技术对图 3 的设计进行加工制作, 得到如图 5 所示的天线实物图. 为验证仿真结果的准确性, 用安捷伦 Agilent 矢量网络分析仪测出 S 参数, 用暗室测量天线辐射方向图.



(a) 偶极子天线的正面



(b) 偶极子天线的背面

图 5 压缩偶极子天线加工实物图

Fig.5 Physical picture of compressed dipole antenna

使用 MATLAB 软件绘制了低副瓣三次模式压缩偶极子天线 $|S_{11}|$ 的仿真和测试结果图如图 6 所示. 从图 6 可以看到, 低副瓣三次模式压缩偶极子天线在 3 GHz 处产生谐振, 实现了 3.07% 的相对工作带宽, 覆盖了 2.948 ~ 3.04 GHz 的目标频段, 天线的测试与仿真曲线比较吻合.

图 7 为 3 GHz 处辐射方向图的仿真和测试结果图, 可以看到仿真和测试的主极化结果基本吻合, 副瓣仅相差 0.4 dB. 天线交叉极化的仿真和测试结果

存在一定差异,测试结果的交叉极化水平均在 14 dB 以下,仿真结果的交叉极化水平均在 17 dB 以下. 天线 3 GHz 处增益的仿真和测试结果较为吻合,两者仅相差 0.11 dBi. 分析仿真和测试交叉极化数值存在差异的主要原因有:天线加工制作精度不高、拼装误差、被测天线安装位置偏差等.

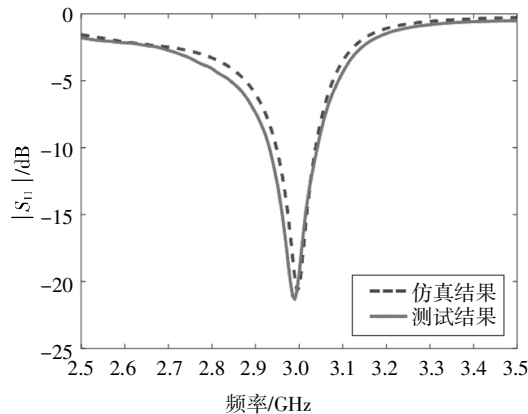


图 6 $|S_{11}|$ 仿真测试对比图

Fig.6 Simulation and test comparison diagram of $|S_{11}|$

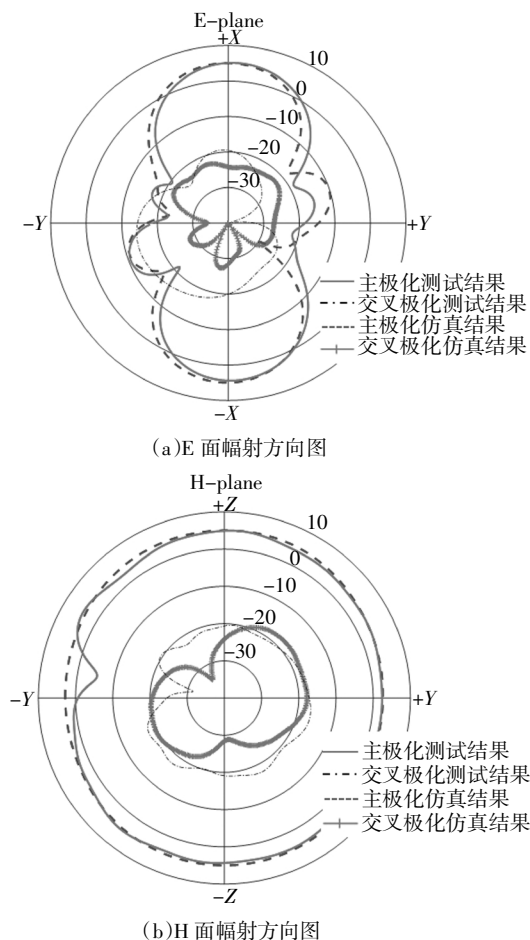


图 7 3 GHz 处辐射方向图的仿真测试对比图

Fig.7 Simulation and test comparison of radiation pattern at 3 GHz

4 结 论

提出了一种低副瓣三次模压缩偶极子天线的设计,通过在压缩偶极子上加载弯折电感的方式,获得较大压缩系数,实现了-15.35 dB 的低副瓣和 5.11 dBi 的增益性能,所加工实物的仿真和测试结果较为吻合. 此设计不仅解决了目前模式压缩偶极子天线存在的高副瓣问题,还保持了天线的增益性能,降低了互扰,增大了天线的传输距离和传输速率.

参考文献

- [1] YAGI H. Beam transmission of ultra short waves [J]. Proceedings of the IEEE, 1997, 85(11): 1864—1874.
- [2] POZAR D M. Beam transmission of ultra short waves; an introduction to the classic paper by H. Yagi [J]. Proceedings of the IEEE, 1997, 85(11): 1857—1863.
- [3] HUANG H C, LU J C, HSU P. A compact dual-band printed yagi-uda antenna for GNSS and CMMB applications [J]. IEEE Transactions on Antennas and Propagation, 2015, 63(5): 2342—2348.
- [4] ISBELL D. Log periodic dipole arrays [J]. IRE transactions on Antennas and Propagation, 1960, 8(3): 260—267.
- [5] WEI X S, LIU J H, LONG Y L. Printed log-periodic monopole array antenna with a simple feeding structure [J]. IEEE Antennas and Wireless Propagation Letters, 2018, 17(1): 58—61.
- [6] CHU Q X, LI X R, YE M. High-gain printed log-periodic dipole array antenna with parasitic cell for 5G communication [J]. IEEE Transactions on Antennas and Propagation, 2017, 65(12): 6338—6344.
- [7] ALEXOPOULOS N, JACKSON D. Fundamental superstrate (cover) effects on printed circuit antennas [J]. IEEE Transactions on Antennas and Propagation, 1984, 32(8): 807—816.
- [8] LUO Y, CHEN Z N. Compressed dipoles resonating at higher order modes with enhanced directivity [J]. IEEE Transactions on Antennas and Propagation, 2017, 65(11): 5697—5701.
- [9] YANG Y J, LI Z, WANG S Z, et al. Miniaturized high-order-mode dipole antennas based on spoof surface plasmon polaritons [J]. IEEE Antennas and Wireless Propagation Letters, 2018, 17(12): 2409—2413.
- [10] 赵文莉, 罗宇, 安文星, 等. 低副瓣模式压缩偶极子天线的研究 [C]//中国电子学会天线分会. 2019 年全国天线年会论文集. 西安: 西安电子科技大学出版社, 2019: 855—857.
ZHAO W L, LUO Y, AN W X, et al. Research on low side-lobe mode compression dipole antennas [C]// Antenna branch of The Chinese Institute of Electronics. NCANT 2019. Xi'an: Xidian University Press, 2019: 855—857. (In Chinese)